

## UN MÉTODO SIMPLE Y RÁPIDO PARA DETERMINAR LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN ENTISOLES FRANCO ARENOSOS

Gisela Vanesa García <sup>1,2\*</sup>, R.E. Ontivero <sup>2,3</sup>, M.A. Lugo <sup>4</sup>, G.A. Studdert <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Unidad Integrada Balcarce. Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria San Juan. Argentina

<sup>4</sup> Facultad de Química, Bioquímica y Farmacia, Instituto Multidisciplinario de Investigaciones Biológicas (IMIBIO-CONICET UNSL), Universidad Nacional de San Luis (UNSL). Argentina

### RESUMEN

La estabilidad de agregados (EA) es el mejor indicador de salud física del suelo. No obstante, su determinación es compleja e insume mucho tiempo, lo que desalienta su uso frecuente. El cambio de diámetro medio ponderado entre un mojado por capilaridad (MC) y un mojado violento (MV) ( $\Delta DMP_{MC-MV}$ ) que demanda seis tamizados en agua, y el índice de estabilidad normalizado (IEN) que requiere, además, una corrección por tamaño de arenas, son indicadores de la EA propuestos. El objetivo del trabajo fue evaluar parámetros más sencillos y rápidos de obtener como indicadores de la EA. Se tomaron muestras de suelo en 0-20 cm en cuatro usos del suelo en Entisoles con textura superficial franco arenosa de la Provincia de San Luis (Argentina). Se determinaron el IEN,  $\Delta DMP_{MC-MV}$ , el diámetro medio ponderado del MV ( $DMP_{MV}$ , tres tamizados), el cambio de masa de macroagregados (2000-8000  $\mu m$ , MA) entre el MC y el MV ( $\Delta masaMA_{MC-MV}$ , dos tamizados) y la masa de MA del MV ( $masaMA_{MV}$ , un tamizado). El IEN presentó un dudoso desempeño para diferenciar entre usos del suelo. El  $\Delta DMP_{MC-MV}$  se relacionó estrechamente con el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  ( $R^2=0,99$ ), permitiendo reducir el número de tamizados a dos. No obstante, ni  $\Delta DMP_{MC-MV}$  ni  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  reflejaron significativamente el efecto del uso del suelo, y presentaron gran variabilidad y valores negativos que dificultan su interpretación. El  $DMP_{MV}$  es un buen indicador de la EA y su uso permitiría reducir el número de tamizados en agua a tres. Sin embargo,  $DMP_{MV}$  se relacionó muy estrechamente con la  $masaMA_{MV}$  ( $R^2=0,99$ ). Así, la EA se podría determinar mediante la estabilidad de los MA medida a través de la  $masaMA_{MV}$  que requiere de sólo un tamizado en agua. Esto alentaría el monitoreo de la salud física del suelo. No obstante, es necesario continuar la investigación en un mayor rango de condiciones edafoclimáticas.

**Palabras clave:** masa de macroagregados grandes, diámetro medio ponderado, cambio de diámetro medio ponderado, índice de estabilidad normalizado.

\* Autor de contacto:  
gisela\_garcia@hotmail.com

Recibido:  
21-03-23

Recibido con revisiones:  
29-05-23

Aceptado:  
02-05-23

## A SIMPLE AND FAST METHOD TO DETERMINE AGGREGATE STABILITY IN SANDY LOAM ENTISOLS

### ABSTRACT

Aggregate stability (EA) is the best soil physical health indicator. However, its determination is complex and time-consuming, which discourages its frequent use. Other proposed indicators are either the mean weighted diameter change between capillary wetting (MC) and aggressive wetting (MV) ( $\Delta DMP_{MC-MV}$ ), which requires six water sieving, or the normalized stability index (IEN), which also requires a correction by sand

size. This study aimed to evaluate simpler and quicker soil parameters as EA indicators. Soil samples were taken at 0-20 cm from Entisols with sandy loam surface texture of San Luis Province (Argentina) under four soil uses. The IEN, the  $\Delta DMP_{MC-MV}$  aggregate mean weight diameter after MV ( $DMP_{MV}$  three sievings), the change of macroaggregate (2000-8000  $\mu m$ , MA) mass between MC and MV ( $\Delta masaMA_{MC-MV}$  two sievings), and the MA mass after MV ( $masaMA_{MV}$  one sieving) were determined. The IEN was not able to differentiate the four soil uses assessed. The  $\Delta DMP_{MC-MV}$  was closely related to  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  ( $R^2=0,99$ ), allowing to reduce the number of water sievings from six to two. However, neither  $\Delta DMP_{MC-MV}$  nor  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  significantly reflected the effect of soil use, since they presented a high variability and negative values that hinder their interpretation. The  $DMP_{MV}$  is a good indicator of EA and its use would allow to reduce the number of water sievings to three. However,  $DMP_{MV}$  was very closely related to  $masaMA_{MV}$  ( $R^2=0,99$ ). Thus, EA could be determined through the stability of MA measured through  $masaMA_{MV}$  which requires only one water sieving. This would encourage soil physical health monitoring. Nevertheless, it is necessary to continue the research considering a greater range of edaphoclimatic conditions.

**Keywords:** mass of large macroaggregates, mean weight diameter; change of mean weight diameter, normalized stability index.

## INTRODUCCIÓN

La estabilidad de agregados es una estimación de la capacidad de los agregados para resistir a la ruptura cuando se somete al suelo a la acción de fuerzas originadas por la acción del agua o de esfuerzos mecánicos externos. Esta propiedad edáfica ha sido postulada como el mejor indicador de la salud física (Aparicio & Costa, 2007; Rabot et al., 2018), debido a que es sensible al manejo del suelo (Aparicio & Costa, 2007; Roldán et al., 2014) y tiene gran influencia sobre su funcionamiento (Rabot et al., 2018). Las variaciones de la estabilidad de agregados están directamente relacionadas con el comportamiento del sistema poroso del suelo y, consecuentemente, con la densidad aparente y la infiltración. Por ello, la estabilidad de agregados se asocia a la dinámica del agua y del aire, la geometría de poros y la resistencia a la erosión. El monitoreo de la estabilidad de agregados es necesario para evaluar la salud edáfica desde el punto de vista físico (Rabot et al., 2018). Particularmente, en suelos de ambientes áridos o semiáridos con altos contenidos de arena y bajos contenidos de materia orgánica, el reemplazo de la cobertura natural [e.g. bosques dominados por caldén (*Neltuma caldenia* (Burkart) C.E. Hughes y G.P. Lewis)] por pasturas o cultivos para grano, junto con prácticas de manejo inadecuadas, ha provocado una pérdida en la estabilidad de agregados haciéndolos más vulnerables a los procesos erosivos. Es por ello que, en dichos ambientes, el monitoreo de la estabilidad de agregados en la capa superficial del suelo cobra vital importancia para evaluar el grado de degradación física y la susceptibilidad a la erosión eólica (Rienzi et al., 2018).

Las metodologías propuestas para la determinación de la estabilidad de agregados insumen mucho tiempo y suelen ser difíciles de realizar, lo que desalienta el monitoreo frecuente de la salud física del suelo. Los métodos más frecuentemente utilizados en Argentina son los descriptos por De Leenher & De Boodt (1958) (Castiglioni & Behrends Kraemer, 2019; Domínguez et al., 2016), Le Bissonnais (1996) (Castiglioni & Behrends Kraemer, 2019; Gabioud et al., 2011) y Six et al. (1998) (García et al., 2020b; Roldan et al., 2014; Tourn et al., 2019), pero no existe un consenso sobre qué metodología es la más conveniente utilizar (Castiglioni & Behrends Kraemer, 2019; Tourn et al., 2020). Para Molisoles de textura franca del sudeste bonaerense, los métodos de Six et al. (1998) y De Leenher & De Boodt (1958) son lo que mejor han permitido distinguir situaciones contrastantes de manejo (Tourn et al., 2020), aunque el de Six et al. (1998) ha permitido diferenciar entre usos del suelo para un rango más amplio de textura (i.e. franco, franco arenoso, franco arcilloso y franco arcillo arenoso). Sin embargo, para Molisoles de textura franco limosa como los del norte bonaerense (Castiglioni & Behrends Kraemer, 2019) y para Molisoles, Vertisoles y Alfisoles de textura arcillo limosa o franco arcillo limosa (Gabioud et al., 2011), el método de Le Bissonnais (1996) ha sido postulado como el más adecuado. Los tres métodos se basan en mecanismos de desagregación al sumergir los agregados en agua, pero se diferencian en la cantidad y tipo de pretratamientos y tamizados en agua. El método de De Leenher & De Boodt (1958) requiere de dos pretratamientos de la muestra y nueve tamizados, el de Le Bissonnais (1996) de tres pretratamientos y seis tamizados y el de Six et al. (1998) de dos pretratamientos y seis tamizados, presentando una ventaja operativa frente a los demás. Más aún, se ha reportado que simplificaciones de la metodología de Six et al. (1998) han mostrado ser promisorias para caracterizar la estabilidad de agregados (García et al., 2020a; King et al., 2019).

En Entisoles de textura franco arenosa de la Provincia de San Luis, la estabilidad de agregados es más

frecuentemente determinada mediante tamizado en seco (Colazo & Buschiazzi, 2010; Rienzi et al., 2018), dado que el efecto de abrasión es considerado más representativo de las fuerzas agresivas del viento a las que están expuestos los agregados en ambientes áridos o semiáridos que el tamizado en húmedo (Rienzi et al., 2018; Saygin et al., 2012). Sin embargo, el método de Six et al. (1998) ha sido evaluado y propuesto para un amplio rango de suelos, entre ellos, de textura franco arenosa (García et al., 2020a, 2020b; Six et al., 2000) y, como tal o en sus versiones simplificadas (García et al., 2020a; King et al., 2019), podría ser adecuado para monitorear el estado de salud física en dichos suelos.

La metodología descrita por Six et al. (1998) contempla la separación de cuatro fracciones por tamaño de agregados mediante tamizados en agua luego de la aplicación de dos pretratamientos de re-humedecimiento de los agregados secos: i) mojado por capilaridad hasta capacidad de campo (MC) y ii) mojado violento (MV). Con las masas de las fracciones de agregados obtenidas se calcula el diámetro medio ponderado (DMP) correspondiente a cada pretratamiento ( $DMP_{MC}$  y  $DMP_{MV}$  respectivamente), que es un índice que caracteriza la estabilidad de agregados de todo el suelo integrando la distribución del tamaño de agregados dentro de un número (Six et al., 2000). Finalmente, se calcula el cambio (i.e. la diferencia) en el DMP de los agregados entre el MC y el MV ( $\Delta DMP_{MC-MV}$ ). Este método implica una inversión considerable de tiempo y, debido a ello, es necesario explorar ajustes en dicho procedimiento con el fin de simplificarlo mediante la reducción en el número de tamizados. Algunas variables obtenidas en el desarrollo de la metodología, y que requieren de una menor cantidad de tamizados en agua que los necesarios para la obtención del  $\Delta DMP_{MC-MV}$  han sido consideradas como buenas indicadores de la estabilidad de agregados. Estas variables son el DMP del MV ( $DMP_{MV}$  tres tamizados), el cambio de masa de macroagregados grandes (2000-8000  $\mu\text{m}$ ) entre el MC y el MV ( $\Delta \text{masaMA}_{MC-MV}$  dos tamizados) y la masa de macroagregados grandes (2000-8000  $\mu\text{m}$ ) remanente luego del tamizado posterior al MV ( $\text{masaMA}_{MV}$  un tamizado) (García et al., 2020a, 2020b; King et al., 2019; Roldán et al., 2014). Particularmente para Molisoles del sudeste bonaerense, la  $\text{masaMA}_{MV}$  resultó ser el mejor indicador de la estabilidad de agregados (García et al., 2020a, 2020b). No obstante, dichos indicadores no han sido evaluados en suelos con otras características edafoclimáticas (e.g. suelos con elevado contenido de arena).

Se ha enunciado que las diferencias en la distribución de tamaño de arenas entre suelos pueden confundir la interpretación de los resultados de la estabilidad de los agregados cuando se emplean indicadores que no consideran una corrección por arenas (Six et al., 2000). Esto se debe a una acumulación preferencial de arena dentro de ciertas fracciones de tamaño de agregados durante el tamizado. Comúnmente, las partículas de arena del mismo tamaño que el agregado no se encuentran dentro de los agregados, sino que son retenidas sobre el tamiz y, por lo tanto, sobreestiman la masa de agregados de la fracción. Así, la ausencia de corrección de la masa de agregados por arenas podría conducir a resultados erróneos de la estabilidad de agregados. Esto cobra especial importancia en suelos con alto contenido de arena, especialmente con alta proporción de arenas gruesas. Por ello, Six et al. (2000) propusieron un índice de estabilidad normalizado (IEN) como un mejor indicador de la estabilidad de agregados que el  $DMP_{MV}$  y el  $\Delta DMP_{MC-MV}$ . El IEN permite corregir el efecto confuso de la distribución de tamaño de arenas entre suelos, clases de tamaño de agregados y pretratamientos (Six et al., 2000). No obstante, su determinación es notablemente más compleja, consume más tiempo y tiene una mayor probabilidad de acumular errores operativos en comparación con los indicadores mencionados anteriormente. Esta complejidad se debe a que requiere la separación de arenas en tres clases de tamaño para cada una de las fracciones de tamaño de agregados recuperadas después del tamizado correspondiente a cada pretratamiento. La necesidad de determinar el IEN como medida de la estabilidad de agregados desalienta aún más el monitoreo frecuente de la salud física del suelo.

Por lo tanto, se debe considerar la utilización de variables de fácil y rápida determinación como indicadores de la estabilidad de agregados en suelos con características edafoclimáticas distintas a las del sudeste bonaerense, en particular, en aquellos con altos contenidos de arena. Esto facilitaría el monitoreo rutinario de la salud física del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño de indicadores de la estabilidad de agregados simples de determinar como el  $\Delta \text{masaMA}_{MC-MV}$ , el  $DMP_{MV}$  y la  $\text{masaMA}_{MV}$  en comparación con el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  y el IEN en Entisoles de textura franco arenosa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cuatro situaciones diferentes de uso del suelo ubicadas en la Provincia de San Luis (República Argentina), con los siguientes niveles de intervención antrópica ordenados en forma creciente: i) BOSQUE: bosque dominado por caldén, bosques secundarios que conservan gran parte de la vegetación natural y en donde ocasionalmente se practica ganadería extensiva (i.e. cría y recría vacuna), ii) PASTO LLORÓN: pastura cultivada de pasto llorón [*Eragrostis curvula* (Schrad.) Nees], parcelas con una antigüedad mínima de 20 años en donde se reemplazó la vegetación natural por la pastura utilizada para ganadería (i.e. cría-recría y/o engorde vacuno), iii) ALFALFA: pastura cultivada de alfalfa (*Medicago sativa* L.) con pastoreo vacuno para cría-recría y/o engorde o con corte de forraje para heno, parcelas con una antigüedad de tres a siete años en donde se desmontó la vegetación natural y luego se realizó el cultivo (Ontivero et al., 2023) y iv) SOJA: monocultivo de soja [*Glycine Max* (L.) Merr.], parcelas en donde se reemplazó la vegetación natural por el cultivo estacional de soja, no se realiza rotación de cultivos ni se utilizan cultivos de cobertura (al menos durante el periodo de recolección de muestras). El paisaje predominante es el de una llanura plana suavemente ondulada. Los suelos son del orden Entisol clasificados como Ustortente típico, mixto, calcáreo, térmico con textura superficial franco arenosa (Tabla 1) formados bajo un régimen de humedad variable (restringida en una parte del año). Son suelos poco evolucionados, con pocos horizontes y escasamente diferenciados, excesivamente drenados, con baja capacidad de retención de agua y con un contenido en materia orgánica bajo (Tabla 1). El perfil del suelo se caracteriza por la presencia de horizontes A1 (0-20 cm, pardo amarillento, bloques subangulares medios débiles, friable, no plástico, no adhesivo, raíces abundantes), C1 (20-50 cm, pardo amarillento, arena franco fino, bloques subangulares medios débiles a grano suelto, muy friable, no plástico, no adhesivo, raíces comunes) y C2 (50- >150 cm, pardo amarillento, arena franco fino, grano simple, muy friable, no plástico, no adhesivo, carbonatos libres, raíces escasas) (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA], 2023). El clima dominante es templado y semiárido, con precipitaciones estivales y grandes amplitudes térmicas estacionales. La temperatura media anual es de 16 °C, siendo enero el mes más cálido y julio el mes más frío. La precipitación media anual es de 630 mm con el 70% de las precipitaciones en verano (diciembre, enero y febrero). Existe un marcado déficit hídrico en al menos 6-7 meses del año y una alta variabilidad interanual en las precipitaciones, existiendo años de precipitaciones abundantes que alternan con años de persistentes sequías, agravado por las altas temperaturas y los vientos desecantes característicos del verano (Kraus et al., 1999).

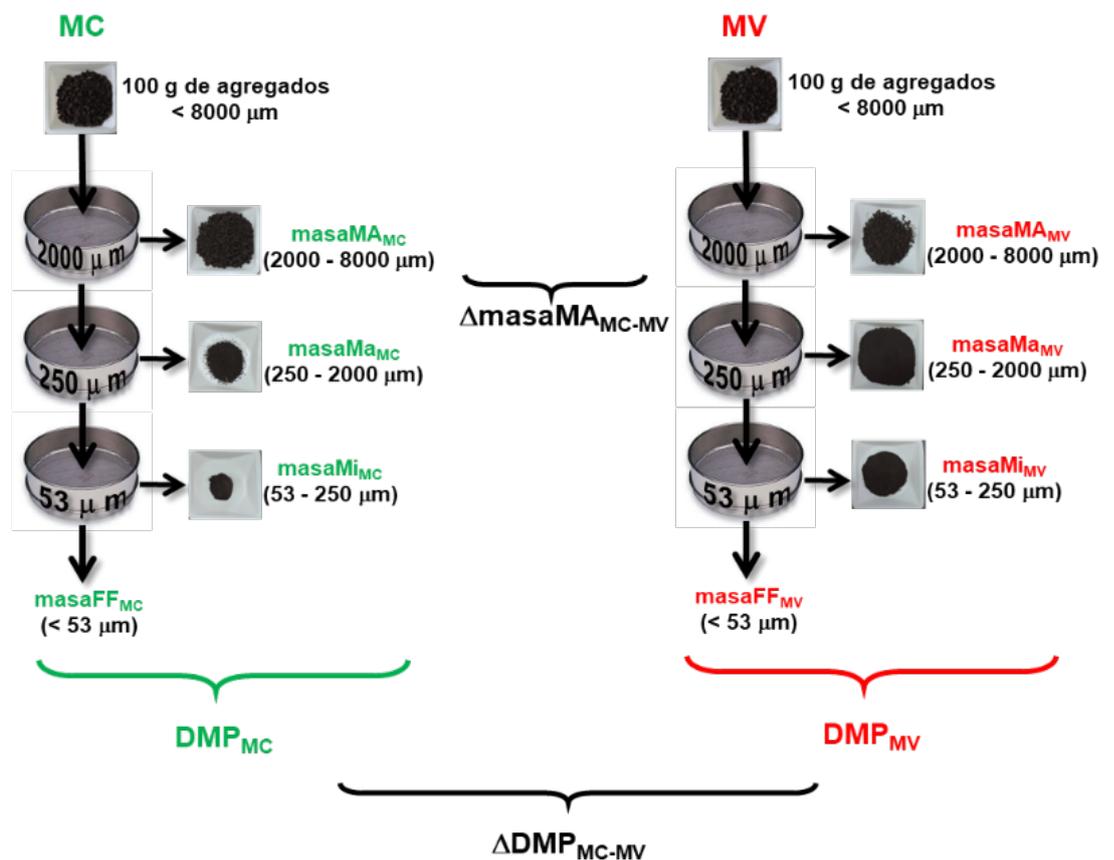
En cada uso del suelo, se establecieron cuatro parcelas de muestreo (i.e. cuatro repeticiones por cada uso del suelo o tratamiento). En cada una de ellas, en primavera (i.e. noviembre), se recolectó una muestra de suelo compuesta por tres submuestras a 0-20 cm de profundidad (i.e. estrato en el que se manifiestan los mayores cambios de las propiedades edáficas debidos al manejo o el uso del suelo, coincidente con la profundidad del horizonte A1). Las muestras de suelo fueron recolectadas con pala a capacidad de campo (i.e. luego de una lluvia). Inmediatamente luego de la extracción (i.e. en condición húmeda), las muestras de suelo fueron cuidadosamente separadas con las manos en sus agregados por sus líneas naturales de ruptura, hasta pasar por un tamiz de 8000  $\mu\text{m}$  de abertura de malla. Luego, las muestras fueron secadas en estufa con circulación forzada de aire a 50 °C hasta peso constante. Una vez obtenidas las muestras secas, se procedió a realizar el MC y el MV, y la separación de agregados por tamaño luego de cada tratamiento de mojado (Six et al., 1998) (Figura 1). Para el MC, 100 g de agregados secos fueron sometidos a un humedecimiento por capilaridad (i.e. dispuestos sobre una gomaespuma embebida en agua dentro de una bandeja plástica con cierre hermético mediante una tapa) durante 24 h a temperatura ambiente hasta capacidad de campo, mientras que para el MV otros 100 g de agregados secos fueron sometidos a una inmersión rápida en agua (i.e. dispuestos sobre un tamiz de 2000  $\mu\text{m}$  sumergido en un balde con agua). Cada una de estas alícuotas permaneció 5 min sumergida en agua sobre un tamiz de 2000  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, mediante tamizados sucesivos en agua [de arriba hacia abajo, con un recorrido de 3 cm y 50 repeticiones durante 2 min en un equipo construido *ad hoc* (Germán Domínguez y Roberto Domínguez)], cada alícuota fue separada en macroagregados grandes (2000-8000  $\mu\text{m}$ ), macroagregados chicos (250-2000  $\mu\text{m}$ ), microagregados (53-250  $\mu\text{m}$ ) y fracción fina (<53  $\mu\text{m}$ ). Las primeras tres fracciones se obtuvieron por retrolavado del correspondiente tamiz, posterior reposo durante 24 h para favorecer el floculado, retiro del sobrenadante, secado en estufa a 50 °C hasta peso constante y, finalmente, pesado. La fracción fina fue descartada y su masa fue calculada como la diferencia entre la masa de agregados inicial (100 g) y la suma de las tres fracciones de agregados recuperadas. Con las masas de las fracciones, se obtuvo: i) la masa  $MA_{MV}$  ii) el  $\Delta masa_{MA_{MV-MC}}$  (Ecuación 1), iii) el  $DMP_{MV}$  (Ecuación 2) y iii) el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  (Ecuación 3) (Six et al., 1998).

$$\Delta \text{masaMA}_{\text{MC-MV}} = \text{masaMA}_{\text{MC}} - \text{masaMA}_{\text{MV}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{DMP}_{\text{MV}} = \sum_{i=1}^4 X_i W_i \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\Delta \text{DMP}_{\text{MC-MV}} = \text{DMP}_{\text{MC}} - \text{DMP}_{\text{MV}} \quad \text{Ecuación 3}$$

En la Ecuación 1,  $\text{masaMA}_{\text{MC}}$  es la masa de macroagregados grandes (i.e. 2000-8000  $\mu\text{m}$ ) luego del MC. En la Ecuación 2,  $i$  identifica a cada fracción separada luego del MV [i.e. 2000-8000 (1), 250-2000 (2), 53-250 (3) y <53 (4)  $\mu\text{m}$ ],  $X_i$  es el diámetro promedio de la fracción  $i$  calculado como la media aritmética de la abertura de malla de dos tamices sucesivos, y  $W_i$  es la proporción de masa de la fracción  $i$  respecto a la muestra total tamizada (100 g). En la Ecuación 3, el DMP luego del MC ( $\text{DMP}_{\text{MC}}$ ) se calculó de la misma forma que el  $\text{DMP}_{\text{MV}}$  (Ecuación 1), pero teniendo en cuenta las masas de las fracciones separadas luego del MC. El  $\Delta \text{DMP}_{\text{MC-MV}}$  y el  $\Delta \text{masaMA}_{\text{MV-MC}}$  son medidas inversas de la estabilidad de agregados, es decir que cuanto mayor es  $\Delta \text{DMP}_{\text{MC-MV}}$  y el  $\Delta \text{masaMA}_{\text{MV-MC}}$  menor es la estabilidad de agregados. Cuando el  $\Delta \text{DMP}_{\text{MC-MV}}$  y el  $\Delta \text{masaMA}_{\text{MV-MC}}$  resultaron en valores negativos, fueron considerados como cero, de manera tal de considerar únicamente pérdidas de masa de las fracciones de agregados entre el MC y el MV (Six et al., 2000).



**Figura 1:** Esquema de la metodología para el fraccionamiento de agregados por tamaño. MV: mojado violento, MC: mojado por capilaridad, DMP: diámetro medio ponderado,  $\Delta \text{DMP}_{\text{MC-MV}}$ : cambio de DMP entre el MC y el MV,  $\text{masaMA}$ : masa de macroagregados de 2000-8000  $\mu\text{m}$  (MA),  $\text{masaMa}$ : masa de macroagregados de 250-2000  $\mu\text{m}$ ,  $\text{masaMi}$ : masa de microagregados,  $\text{masaFF}$ : masa de la fracción fina,  $\Delta \text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$ : cambio de masa de MA entre el MC y el MV. Adaptado de García et al. (2020a).

**Figure 1:** Scheme of the methodology for aggregate size separation. MV: sudden immersion re-wetting, MC: capillary re-wetting, DMP: mean weight diameter,  $\Delta \text{DMP}_{\text{MC-MV}}$ : change of DMP between MC and MV,  $\text{masaMA}$ : 2000–8000  $\mu\text{m}$  macroaggregate dry mass (MA),  $\text{masaMa}$ : 250–2000  $\mu\text{m}$  macroaggregate dry mass,  $\text{masaMi}$ : microaggregate dry mass,  $\text{masaFF}$ : fine fraction dry mass.  $\Delta \text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$ : change of  $\text{masaMA}$  between MC and MV. Adapted from García et al. (2020a).

Para determinar el IEN, una alícuota de 10 g de cada fracción de agregados (i.e. 2000-8000, 250-2000 y 50-250  $\mu\text{m}$ ) obtenida luego de cada pretratamiento (i.e. MC y MV) fue tratada con peróxido de hidrógeno a 90 °C hasta asegurarse la oxidación total de la materia orgánica. Posteriormente, la fracción mineral obtenida fue dispersada con una solución con hexametáfosfato de sodio 5 g L<sup>-1</sup> y pasada por un tamiz de 53  $\mu\text{m}$  de abertura de malla con ayuda de agua desionizada. La grava y la arena retenidas sobre el tamiz fueron secadas a 50 °C hasta peso constante y pesadas. Posteriormente, dicha fracción fue separada en grava y cinco clases de tamaño de arena [i.e. grava (2000-8000  $\mu\text{m}$ ), arenas muy gruesas (1000-2000  $\mu\text{m}$ ), arenas gruesas (500-1000  $\mu\text{m}$ ), arenas medianas (250-500  $\mu\text{m}$ ), arenas finas (100-250  $\mu\text{m}$ ) y arenas muy finas (53-100  $\mu\text{m}$ )] mediante un tamizado en seco durante 30 segundos con un tamizador vibratorio. De acuerdo con lo propuesto por Six et al. (2000), se calculó el nivel de disrupción de cada fracción de agregados ( $DLS_i$ , Ecuación 4), el máximo  $DLS_i$  ( $DLS_{i(max)}$ , Ecuación 5), el nivel de disrupción de todo de suelo (DL, Ecuación 6), el máximo DL ( $DL_{max}$ , Ecuación 7) y, finalmente, el IEN (Ecuación 8).

$$DLS_i = \frac{[(W_{iMC}-S_{iMC})-(W_{iMV}-S_{iMV})]+|(W_{iMC}-S_{iMC})-(W_{iMV}-S_{iMV})|}{2} \times \frac{1}{W_{iMC}-S_{iMC}}$$

Ecuación 4

$$DLS_{i(max)} = \frac{(W_{iMC}-W_{ipMV})+|W_{iMC}-W_{ipMV}|}{2} \times \frac{1}{W_{iMC}-S_{iMC}}$$

Ecuación 5

$$DL = \frac{1}{n} \sum_i^n [(n+1) - I] \times DLS_i$$

Ecuación 6

$$DL_{max} = \frac{1}{n} \sum_i^n [(n+1) - I] \times DLS_{i(max)}$$

Ecuación 7

$$IEN = 1 - \frac{DL}{DL_{max}}$$

Ecuación 8

En la Ecuación 4,  $i$  es cada fracción de agregados (i.e. 2000-8000, 250-2000 y 53-250  $\mu\text{m}$ ),  $W_{iMC}$  y  $W_{iMV}$  corresponden a la proporción de peso de muestra de la fracción de agregados  $i$  remanente del MC y del MV, respectivamente, y  $S_{iMC}$  y  $S_{iMV}$  corresponden a la proporción de peso de arena con tamaño  $i$  en la fracción de agregados  $i$  remanente del MC y del MV, respectivamente. En la Ecuación 5,  $W_{ipMV}$  es la proporción de peso de arena de tamaño  $i$  en todo el suelo (i.e. contempla todas las fracciones de agregados) después del MV. En la Ecuación 6,  $n$  es el número de clases de tamaño de agregados (i.e. 4) e  $I$  representa a cada fracción de agregados con un número entre 1 y 4 (i.e. 4 para 2000-8000  $\mu\text{m}$ , 3 para 250-2000  $\mu\text{m}$ , 2 para 53-250  $\mu\text{m}$  y 1 para 0-53  $\mu\text{m}$ ).

El contenido de materia orgánica se estimó a partir de la cuantificación de carbono orgánico fácilmente oxidable por el método de Walkley & Black (1934). La textura fue determinada mediante el método de la pipeta de Robinson (Robinson, 1922; Fernández et al., 2017). Las arenas en la masa total del suelo fueron separadas por tamaño siguiendo el procedimiento descrito previamente. El análisis estadístico de los datos fue realizado con el programa R (R Core Team, 2020). Las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene fueron llevadas a cabo para cada variable con el fin de corroborar que presentaran distribución normal y varianzas homogéneas. Dado que el  $DMP_{MV}$ , la masa  $MA_{MV}$  y los contenidos de arenas muy gruesas, gruesas y medianas no presentaron distribución normal, fueron transformadas a logaritmo decimal. El efecto del uso del suelo sobre las variables fue analizado mediante análisis de varianza y las medias fueron comparadas por la prueba de diferencias mínimas significativas. Se evaluó la relación entre las distintas variables a través de coeficientes de correlación de Pearson y el ajuste de modelos de regresión lineal simple. El cumplimiento de los supuestos de los modelos de regresión lineal simple fue analizado gráficamente mediante el comportamiento de los residuales. Se utilizó un nivel de significación de 0,05 ( $P < 0,05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los contenidos de arena, arcilla y limo estuvieron entre 637,0 y 729,0 g kg<sup>-1</sup> (promedio de 690,9 g kg<sup>-1</sup>), 47,0 y 159,0 g kg<sup>-1</sup> (promedio de 104,1 g kg<sup>-1</sup>) y 185,0 y 227,0 g kg<sup>-1</sup> (promedio de 205,0 g kg<sup>-1</sup>), respectivamente. Las arenas entre 250 y 2000 µm (i.e. muy gruesas, gruesas y medianas) representaron entre el 1,1 y 18,8 % (promedio de 5,6 %) de las arenas totales, mientras que las arenas entre 53 y 250 µm (i.e. finas y muy finas), representaron entre el 81,2 y 98,9 % (promedio de 94,4 %) de las arenas totales. La mayoría de las muestras no presentaron grava y, en los casos en los que estuvo presente, sus valores fueron despreciables (entre 0,03 y 1,95 %, promedio de 0,48 %).

Los cuatro usos del suelo se caracterizaron por poseer similar contenido promedio de arena, arcilla y limo (Tabla 1). Asimismo, los usos del suelo no difirieron significativamente en la distribución por tamaño de arenas (Tabla 1). En todos los usos del suelo, hubo presencia de arenas muy gruesas, gruesas, medianas, finas y muy finas, aunque estas últimas dos categorías de tamaño constituyeron la mayor proporción de las arenas (Tabla 1). El contenido de materia orgánica estuvo entre 7,2 y 18,7 g kg<sup>-1</sup>, con un promedio de 10,3 g kg<sup>-1</sup>. Hubo efecto del uso del suelo sobre el contenido de materia orgánica, tendiendo a manifestar una disminución en dicha variable con aumentos en el nivel de intervención antrópica (BOSQUE > PASTO LLORÓN > ALFALFA > SOJA), aunque no siempre con diferencias significativas (Tabla 1).

**Tabla 1:** Medias de contenidos de materia orgánica, arcilla, limo, arena total y de diferentes tamaños (muy gruesas, gruesas, medianas, finas y muy finas) y logaritmo decimal (Log) de arenas muy gruesas, gruesas y medianas bajo diferentes usos del suelo. Para cada variable, letras iguales indican diferencias no significativas de la media entre usos del suelo (P < 0,05). Los números entre paréntesis debajo del valor de la media son los errores estándar.

**Table 1:** Means of the contents of organic matter, clay, silt, and total sand contents, and sand size distribution (very coarse, coarse, medium, fine, and very fine), and decimal logarithm (Log) of very coarse, coarse, medium sand under different soil uses. For each variable, similar letters indicate nonsignificant differences among the means of the different soil uses (P < 0,05). Values between parenthesis below the means are the standard errors.

Variable	Uso del suelo							
	BOSQUE		PASTO LLORÓN		ALFALFA		SOJA	
MO (g kg <sup>-1</sup> )	14,0 (2,0)	A	10,5 (0,8)	AB	9,0 (0,5)	B	8,0 (0,3)	B
Arcilla (g kg <sup>-1</sup> )	77,5 (14,0)	A	129,0 (11,4)	A	101,5 (24,2)	A	108,2 (17,1)	A
Limo (g kg <sup>-1</sup> )	210,7 (6,02)	A	200,5 (5,75)	A	205,7 (9,83)	A	203,0 (8,73)	A
Arena total (g kg <sup>-1</sup> )	711,7 (8,56)	A	670,5 (15,7)	A	692,7 (14,8)	A	688,7 (18,9)	A
Arena muy gruesa (1000-2000 µm) (g kg <sup>-1</sup> )	2,44 (0,51)		5,13 (3,51)		5,88 (3,19)		2,12 (0,35)	
Log arena muy gruesa (1000-2000 µm) (log g kg <sup>-1</sup> )	0,36 (0,08)	A	0,31 (0,39)	A	0,49 (0,34)	A	0,31 (0,07)	A
Arena gruesa (500-1000 µm) (g kg <sup>-1</sup> )	8,07 (1,18)		16,97 (6,32)		19,03 (8,98)		5,97 (1,10)	
Log arena gruesa (500-1000 µm) (log g kg <sup>-1</sup> )	0,89 (0,06)	A	1,04 (0,28)	A	1,10 (0,23)	A	0,76 (0,08)	A
Arena mediana (250-500 µm) (g kg <sup>-1</sup> )	23,1 (6,06)		36,5 (14,9)		41,4 (22,9)		9,55 (1,24)	

Log arena mediana (250-500 $\mu\text{m}$ ) (log g kg <sup>-1</sup> )	1,32 (0,12)	A	1,41 (0,23)	A	1,40 (0,25)	A	0,97 (0,05)	A
Arena fina (100-250 $\mu\text{m}$ ) (g kg <sup>-1</sup> )	152,2 (6,93)	A	163,3 (18,8)	A	187,5 (21,3)	A	161,2 (15,6)	A
Arena muy fina (53-100 $\mu\text{m}$ ) (g kg <sup>-1</sup> )	540,1 (47,0)	A	539,8 (25,9)	A	585,6 (40,07)	A	644,1 (8,84)	A

El IEN presentó valores mínimo, máximo y promedio de 0,57; 0,98 y 0,80, respectivamente. Hubo efecto significativo del uso del suelo sobre el IEN (Tabla 2). Sin embargo, el IEN tuvo un dudoso desempeño para diferenciar entre usos del suelo, dado que la estabilidad de agregados reflejada por el IEN no fue coincidente con el nivel de intervención antrópica ni el contenido de materia orgánica. Así, los cuatro usos del suelo presentaron el siguiente orden de IEN: PASTO LLORÓN > ALFALFA > BOSQUE > SOJA (Tabla 2), y el IEN no estuvo correlacionado con el contenido de materia orgánica. No obstante, esto último puede ser debido a la influencia de otros factores diferentes del contenido de materia orgánica, asociados con los distintos sistemas radicales predominantes en cada uso del suelo y que, si bien no fueron considerados en el estudio, puedan haber afectado la estabilidad de agregados de forma diferencial: i) propiedades bioquímicas de fracciones orgánicas determinadas por la vegetación, los exudados radicales y la actividad microbiana relacionada que podrían conferir atributos tales como hidrofobicidad que incrementarían la estabilidad de agregados (Chenu et al., 2000); ii) el menor grado de disturbio o remoción del suelo y la mayor abundancia de raíces que incrementarían la estabilidad de agregados debido a los efectos físicos y microbiológicos de las raíces (Six et al., 2004); iii) la mayor colonización y persistencia de raíces que incrementaría la rizósfera (Haynes & Francis, 1993), la producción de sustancias microbianas cementantes (i.e. glomalina, polisacáridos, entre otros), y el entrelazado de partículas de suelo por hongos y actinomicetes (Chenu & Cosentino, 2007).

**Tabla 2:** Medias de índice de estabilidad normalizado (IEN), cambio de diámetro medio ponderado (DMP) entre el mojado por capilaridad (MC) y el mojado violento (MV) ( $\Delta DMP_{MC-MV}$ ), cambio de masa de macroagregados grandes entre 2000 y 8000  $\mu\text{m}$  (MA) entre el MC y el MV ( $\Delta\text{masaMA}_{MC-MV}$ ), DMP del MV ( $DMP_{MV}$ ), logaritmo decimal de  $DMP_{MV}$  ( $\log DMP_{MV}$ ), masa de MA remanente del MV ( $\text{masaMA}_{MV}$ ) y logaritmo decimal de  $\text{masaMA}_{MV}$  ( $\log \text{masaMA}_{MV}$ ) en diferentes usos del suelo. Para cada variable, letras iguales indican diferencias no significativas de la media entre usos del suelo ( $P < 0,05$ ). Los números entre paréntesis debajo del valor de la media son los errores estándar.

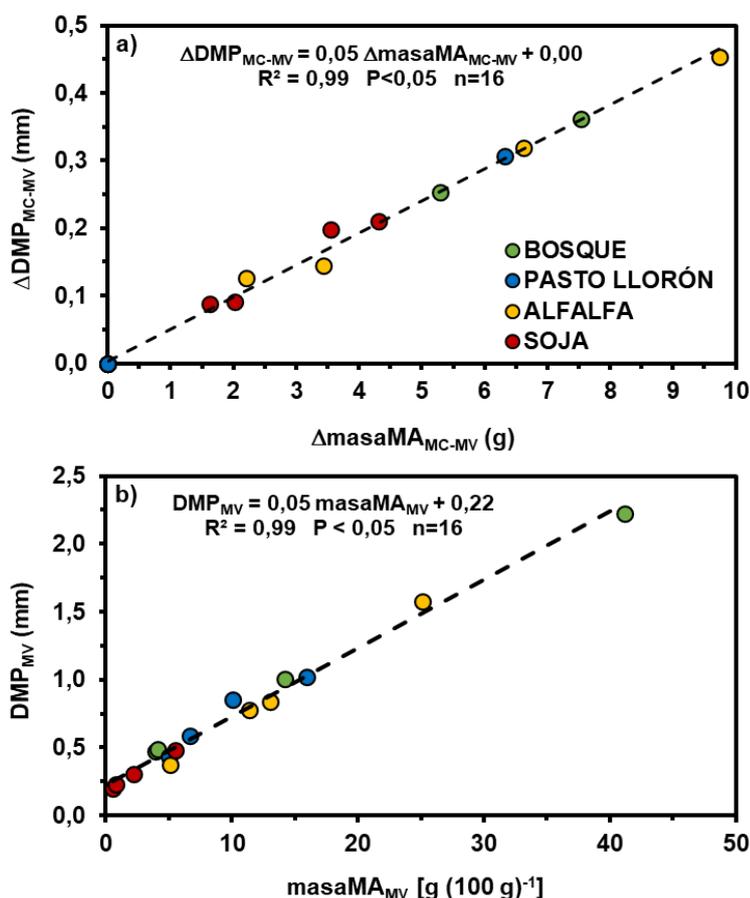
**Table 2:** Means of normalized stability index (IEN), change of mean weight diameter (DMP) between capillary re-wetting (MC) and sudden immersion re-wetting (MV) ( $\Delta DMP_{MC-MV}$ ), change of large macroaggregate mass (i.e. 2000–8000  $\mu\text{m}$ , MA) between MC and MV ( $\Delta\text{masaMA}_{MC-MV}$ ), DMP of MV ( $DMP_{MV}$ ), the decimal logarithm of  $DMP_{MV}$  ( $\log DMP_{MV}$ ), mass of MA of MV ( $\text{masaMA}_{MV}$ ), and the decimal logarithm of  $\text{masaMA}_{MV}$  ( $\log \text{masaMA}_{MV}$ ) under different soil uses. For each variable, similar letters indicate nonsignificant differences among means of the different soil uses ( $P < 0.05$ ). Values between parenthesis below the means are the standard errors.

Variable	Uso del suelo							
	BOSQUE		PASTO LLORÓN		ALFALFA		SOJA	
IEN	0,76 (0,03)	B	0,88 (0,03)	A	0,82 (0,02)	AB	0,72 (0,05)	B
$\Delta DMP_{MC-MV}$ (mm)	0,15 (0,09)	A	0,08 (0,08)	A	0,26 (0,08)	A	0,15 (0,03)	A
$\Delta\text{masaMA}_{MC-MV}$ (mm)	3,21 (1,91)	A	1,58 (1,58)	A	5,50 (1,69)	A	2,88 (0,63)	A
$DMP_{MV}$ (mm)	1,05 (0,41)		0,72 (0,13)		0,89 (0,25)		0,30 (0,06)	
$\log DMP_{MV}$ (log mm)	-0,07 (0,16)	A	-0,16 (0,08)	AB	-0,10 (0,13)	A	-0,54 (0,08)	B
$\text{masaMA}_{MV}$ [g (100 g) <sup>-1</sup> ]	15,86 (8,77)		9,43 (2,40)		13,64 (4,20)		2,25 (1,14)	
$\log \text{masaMA}_{MV}$ [log g (100 g) <sup>-1</sup> ]	0,99 (0,24)	A	0,93 (0,11)	A	1,07 (0,14)	A	0,17 (0,23)	B

Los valores de  $\Delta DMP_{MC-MV}$  estuvieron entre 0,00 y 0,45 mm, con un promedio de 0,16 mm. No hubo efecto significativo del uso del suelo sobre dicha variable, probablemente debido a la gran variabilidad entre repeticiones de campo (Tabla 2). Asimismo, si bien no hubo diferencias significativas entre usos del suelo, los valores promedio de  $\Delta DMP_{MC-MV}$  reflejaron el siguiente orden de estabilidad de agregados: PASTO LLORÓN > SOJA > BOSQUE > ALFALFA (Tabla 2). Dicho orden no coincidió con el nivel de disturbio antrópico, ni con el contenido de materia orgánica (Tabla 1) ni con el IEN (Tabla 2). De hecho, el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  no estuvo correlacionado con el IEN ni con el contenido de materia orgánica. El  $\Delta DMP_{MC-MV}$  surge a partir de las determinaciones del  $DMP_{MC}$  y del  $DMP_{MV}$  para lo que se requieren seis tamizados en agua (Figura 1, Ecuación 3). El  $DMP_{MC}$  presentó valores entre 0,29 y 2,03 mm (promedio de 0,84 mm) (datos por uso del suelo no mostrados), mientras que el  $DMP_{MV}$  presentó valores entre 0,20 y 2,22 mm (promedio de 0,74 mm) (datos por uso del suelo en Tabla 2). El  $DMP_{MC}$  se correlacionó estrechamente con la  $\text{masaMA}_{MC}$  ( $r=0,99$ ). Del mismo modo, el  $DMP_{MV}$  se correlacionó con la  $\text{masaMA}_{MV}$  con un coeficiente de correlación de Pearson similar ( $r=0,99$ ). Esto sugiere que, en lugar de determinar el  $DMP_{MC}$  y el  $DMP_{MV}$  (seis tamizados, Figura 1), podría simplificarse la metodología determinando sólo la  $\text{masaMA}_{MC}$  y la  $\text{masaMA}_{MV}$  (dos tamizados, Figura 1) para, finalmente, calcular el  $\Delta\text{masaMA}_{MC-MV}$  (Figura 1, Ecuación 1).

El  $\Delta\text{masaMA}_{MC-MV}$  presentó valores de entre 0,00 y 9,74 g y un promedio de 3,29 g. Esta variable no se correlacionó con el IEN, pero sí se relacionó estrecha y positivamente con el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  ( $r=0,99$ ). El  $\Delta\text{masaMA}_{MC-MV}$  representa la estabilidad de los macroagregados grandes (i.e. 2000-8000  $\mu\text{m}$ ) y ha resultado

ser muy sensible a las prácticas de manejo (Roldán et al., 2014). No obstante, dado que presentó un comportamiento similar al del  $\Delta\text{DMP}_{\text{MC-MV}}$  tampoco fue sensible a los cambios en el uso del suelo (Tabla 2) ni estuvo correlacionado con el IEN ni con el contenido de materia orgánica. Asimismo, manifestó el siguiente orden de estabilidad de agregados bajo los distintos usos del suelo: PASTO LLORÓN > SOJA > BOSQUE > ALFALFA, aunque las diferencias entre los promedios no fueron significativas ( $P > 0,05$ ) (Tabla 2). La estrecha relación entre ambas variables posibilitó el ajuste de un modelo de regresión lineal simple a partir del cual se podría predecir el  $\Delta\text{DMP}_{\text{MC-MV}}$  a partir del  $\Delta\text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$  con una gran precisión (Figura 2a). Estos resultados coinciden con los reportados por García et al. (2020a) para Molisoles del sudeste de la Provincia de Buenos Aires con contenidos de arena, en general, menores, y mayores contenidos de materia orgánica. Estos autores observaron una asociación similar ( $r=0,99$ ) entre el  $\Delta\text{DMP}_{\text{MC-MV}}$  y el  $\Delta\text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$ . Lo informado indica que la separación en fracciones de agregados menores que  $2000\ \mu\text{m}$  (i.e.  $250\text{-}2000$ ,  $53\text{-}250$  y  $<53\ \mu\text{m}$ ) no sería necesaria para determinar el  $\Delta\text{DMP}_{\text{MC-MV}}$ . Esta variable dependería, entonces, casi exclusivamente de la estabilidad de los macroagregados grandes determinada mediante el  $\Delta\text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$ . De este modo, sería posible reducir la cantidad de tamizados en agua de seis a dos para determinar la estabilidad de agregados.



**Figura 2:** Modelo de regresión lineal simple entre el cambio diámetro medio ponderado (DMP) entre el mojado por capilaridad (MC) y el mojado violento (MV) ( $\Delta\text{DMP}_{\text{MC-MV}}$ ) y el cambio de masa de macroagregados entre  $2000$  y  $8000\ \mu\text{m}$  (MA) entre el MC y el MV ( $\Delta\text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$ ) (a) y entre el DMP del MV ( $\text{DMP}_{\text{MV}}$ ) y la masa de MA remanente luego del MV ( $\text{masaMA}_{\text{MV}}$ ) (b), considerando cuatro usos del suelo (i.e. BOSQUE, PASTO LLORÓN, ALFALFA y SOJA).

**Figure 2:** Simple linear regression model between the change of mean weight diameter (DMP) between capillary re-wetting (MC) and sudden immersion re-wetting (MV) ( $\Delta\text{DMP}_{\text{MC-MV}}$ ) and the change of macroaggregate mass between  $2000$ – $8000\ \mu\text{m}$  (MA) between MC and MV ( $\Delta\text{masaMA}_{\text{MC-MV}}$ ) (a), and between DMP of MV ( $\text{DMP}_{\text{MV}}$ ) and dry mass of MA after MV ( $\text{masaMA}_{\text{MV}}$ ) (b), considering four soil uses (i.e. BOSQUE, PASTO LLORÓN, ALFALFA y SOJA).

Sin embargo, al igual que el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  no fue lo suficientemente sensible para diferenciar significativamente la estabilidad de agregados asociada a los cuatro usos del suelo evaluados. El  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  presentó gran variabilidad entre repeticiones de campo (Tabla 1) y no reflejó el nivel de intervención antrópica ni el contenido de materia orgánica (Tabla 1), como era esperable. Asimismo, algunas de las determinaciones de laboratorio tanto de  $\Delta DMP_{MC-MV}$  como de  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  presentaron valores negativos que, dada la imposibilidad de interpretarlos como indicadores de la estabilidad de agregados, fueron considerados como cero (datos no mostrados). El ingreso violento de agua a los agregados del suelo (MV) constituye el disturbio al cual se somete la muestra de suelo para evaluar la estabilidad de agregados, mientras que el MC separa los agregados por tamaño cuando están en su estado de máxima estabilidad (Six et al., 1998). Por ello, se espera que la  $masaMA_{MV}$  y el  $DMP_{MV}$  sean menores que la  $masaMA_{MC}$  y el  $DMP_{MC}$ , respectivamente, y, así, el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  y el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  tomen valores positivos. La escasa diferencia entre la  $masaMA_{MV}$  y la  $masaMA_{MC}$ , así como entre el  $DMP_{MV}$  y el  $DMP_{MC}$  en algunas de las muestras analizadas, produjo resultados contrarios a los esperados. Lo expuesto sugiere que el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  y el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  no serían adecuados indicadores de la estabilidad de agregados en los suelos estudiados. En relación con esto, García et al. (2020a) informaron para Molisoles del sudeste bonaerense que el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  y  $\Delta DMP_{MC-MV}$  no resultaron ser buenos indicadores de la estabilidad de agregados, dado que no permitieron distinguir suelos cuyas  $masaMA_{MV}$  y  $masaMA_{MC}$  (y  $DMP_{MV}$  y  $DMP_{MC}$ ) fueron diferentes. Esto pone en duda el uso del  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  y del  $\Delta DMP_{MC-MV}$  como indicadores de salud edáfica en distintas situaciones edafoclimáticas.

Por otro lado, el  $DMP_{MV}$  es considerado *per se* un indicador de la EA (King et al., 2019). Esto se debe a que este pretratamiento provoca que el agua ingrese rápidamente en los poros de los agregados secos y que se generen grandes fuerzas internas por compresión del aire en su interior, lo que ocasiona un gran disturbio y/o aumenta la vulnerabilidad de los agregados ante el tamizado (Six et al., 1998). Así, las masas de agregados remanentes al tamizar luego de un MV contienen sólo agregados estables (Roldán et al., 2014). En el presente estudio, hubo efecto del uso del suelo sobre el logaritmo decimal de  $DMP_{MV}$  (Tabla 2). El  $DMP_{MV}$  reflejó el siguiente nivel creciente de estabilidad de agregados en los cuatro usos del suelo: BOSQUE > ALFALFA > PASTO LLORÓN > SOJA, con mayor coincidencia con el nivel de disturbio antrópico y el contenido de materia orgánica que el desempeño presentado por el IEN, el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  y el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$ . El  $DMP_{MV}$  no se correlacionó con el IEN, ni con el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  ni con el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  pero sí se correlacionó positivamente con el contenido de materia orgánica ( $r=0,68$ ). La obtención del  $DMP_{MV}$  presenta mayor simplicidad metodológica que la obtención del  $\Delta DMP_{MC-MV}$  ya que requiere sólo tres tamizados en agua por muestra, no requiere un período adicional de 24 h para el MC y se debe recuperar y pesar una menor cantidad de fracciones de agregados. Sin embargo, como se mencionó previamente, el  $DMP_{MV}$  se correlacionó estrechamente con la  $masaMA_{MV}$  ( $r=0,99$ ) (Figura 2b). De esta manera, la  $masaMA_{MV}$  que presentó valores de entre 0,52 y 41,16 g (100 g)<sup>-1</sup> y un promedio de 10,29 g (100 g)<sup>-1</sup>, tuvo el mismo comportamiento que el  $DMP_{MV}$  frente a los usos del suelo. Asimismo, la  $masaMA_{MV}$  no estuvo correlacionada con el IEN, ni el  $\Delta DMP_{MC-MV}$  ni el  $\Delta masaMA_{MC-MV}$  pero sí estuvo positivamente correlacionada con el contenido de materia orgánica ( $r=0,68$ ). El logaritmo decimal de la  $masaMA_{MV}$  fue afectado de manera diferencial por los usos del suelo reflejando el siguiente orden decreciente de estabilidad de agregados: BOSQUE > ALFALFA > PASTO LLORÓN > SOJA, aunque sólo SOJA fue significativamente menor que los demás usos (Tabla 2). Esto indica que el  $DMP_{MV}$  es dependiente casi únicamente del valor de  $masaMA_{MV}$  y no de la masa remanente del resto de las fracciones (i.e. 250-2000, 53-250 y <53  $\mu m$ ). Dicho de otro modo, la estabilidad de agregados es definida por la estabilidad de los macroagregados grandes entre 2000 y 8000  $\mu m$  medida a través de la  $masaMA_{MV}$ . La Figura 2b presenta un modelo de regresión lineal simple con pendiente positiva y elevado R<sup>2</sup> que permitiría predecir el  $DMP_{MV}$  a partir de la  $masaMA_{MV}$ . Estos resultados indican que el  $DMP_{MV}$  aumenta con incrementos en la  $masaMA_{MV}$  y esta variable podría ser utilizada como un indicador de la estabilidad de agregados en coincidencia con los resultados observados para Molisoles del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (García et al., 2020a, 2020b). Así, con la inmersión en agua de los agregados durante 5 min sobre un tamiz de 2000  $\mu m$ , el posterior tamizado en agua durante 2 min y la recuperación, secado y pesado de una única fracción de agregados, podría obtenerse un indicador confiable de la estabilidad de agregados. Esto permitiría simplificar aún más la metodología de determinación de la estabilidad de agregados propuesta por Six et al. (1998), reduciendo la cantidad de tamizados en agua a sólo uno. Además, el uso de esta metodología no requiere de la realización del MC, la corrección por tamaño de arenas, y la recuperación, secado y pesado de una gran cantidad de fracciones de agregados y, eventualmente, de arenas. No obstante, es factible considerar la necesidad de continuar la investigación en un rango más amplio de condiciones edafoclimáticas. Esto permitiría: i) corroborar los resultados observados en las dos regiones ya evaluadas (San Luis y sudeste de Buenos Aires), ii) comprobar la sensibilidad de la  $masaMA_{MV}$  a los

cambios producidos por las prácticas de manejo y los usos del suelo, y iii) ampliar el alcance geográfico de su uso como indicador de la estabilidad de agregados.

### CONCLUSIONES

En las condiciones edafoclimáticas estudiadas, la determinación de la estabilidad de agregados podría ser simplificada reduciendo el número de tamizados en agua y la eliminación de otros procedimientos inherentes a otros indicadores de la estabilidad de agregados. Esto es así porque, la masa  $MA_{MV}$  que se determina mediante un único tamizado en agua, resultó ser un adecuado indicador de la estabilidad de agregados. No obstante, es necesario continuar la investigación en un rango de situaciones edafoclimáticas más amplias y comparar la masa  $MA_{MV}$  con los indicadores de estabilidad de agregados logrados con otras metodologías [e.g. De Leenher & De Boodt (1958), Le Bissonais (1996), Colazo & Buschiazzo (2010)] con el fin de explorar su potencialidad de uso. Esto promovería el monitoreo de la salud física del suelo.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos otorgados por la Universidad Nacional de Mar del Plata (proyectos AGR653/21 y AGR689/22), el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2021-I-INVI-00619), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (RIST I-503) y la Universidad Nacional de San Luis (PROICO 02-2023). Además, agradecemos la asistencia brindada por E. M. Crespo, H. J. Iriarte, L. Risio Allione, C. Y. Rodríguez y G. A. Quiroga durante la recolección y el traslado de muestras.

### REFERENCIAS

- Aparicio, V. C. & Costa, J. L. (2007). Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.05.006>.
- Castiglioni, M. G. & Behrens Kraemer, F. B. (2019). Short-term effect of cover crops on aggregate stability assessed by two techniques. *Ciencia del Suelo*, 37(2), 298-314.
- Chenu, C. & Cosentino, D. (2007). Microbial regulation of soil structural dynamics. En K. Ritz y I. Young (Eds.), *The architecture and biology of soils: life in inner space* (pp. 37-70). CABI.
- Chenu, C.; Le Bissonais, Y. & Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1479-1486. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6441479x>.
- Colazo, J. C. & Buschiazzo, D. E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1-2), 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.016>
- De Leenher, L. & De Boodt, M. (1958). Determination of aggregate stability by change in mean weight diameter. *Proceedings of the International Symposium on Soil Structure* (pp. 290-300). Van de Landbouwhoghe School.
- Domínguez, G. F., García, G. V., Studdert, G. A., Agostini, M. A., Tourn, S. N., & Domingo, M. N. (2016). Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as soil health indicator? *Spanish Journal of Soil Science*, 6, 82-97. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2016.V6.N2.01>.
- Fernández, R., Quiroga, A. y Noellemeyer, E. (2017). Comparación de métodos de determinación de textura en Ustoles de la Región Semiárida Pampeana. En N. Kloster (Ed.), *Métodos de análisis e implementación de Calidad en el Laboratorio de Suelos* (pp. 75-82). INTA Ediciones.
- Gabioud, E. A., Wilson, M. G., y Sasal, M. C. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo*, 29, 129-139.
- García, G. V., Tourn, S. N., Roldán, M. F., Mandiola, M. & Studdert, G. A. (2020a). Simplifying the determination of aggregate stability indicators of Mollisols. *Communication in Soil Science and Plant Analyses*, 51(4), 481-490. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1717513>.
- García, G. V., Wyngaard, N., Reussi Calvo, N. I., San Martino, S., Covacevich, F. & Studdert, G. A. (2020b). Soil survey reveals a positive relationship between aggregate stability and anaerobic mineralizable nitrogen. *Ecological Indicators*, 117, 106640. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106640>.
- Gee, G. W. & Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. En G. R. Blake & K. H. Hartge (Eds.), *Methods of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods - agronomy monograph 9*. (2a ed., Agronomy Monograph 9) (pp. 383-411). Am. Soc. Agron. Inc. - Soil Sci. Soc. Am. Inc.
- Haynes, R. J. & Francis, G. S. (1993). Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions. *Journal of Soil Science*, 44, 665-675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02331.x>.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. Recuperado el 06 de diciembre, 2023, de <https://geo.inta.gob.ar/#10.09/-33.5774/-65.4545>.
- King, A. E., Congreves, K. A., Deen, B., Dunfield, K. E., Voroney, R. P. & Wagner-Riddle, C. (2019). Quantifying the relationships between soil fraction mass, fraction carbon, and total soil carbon to assess mechanisms of physical protection. *Soil Biology and Biochemistry*, 135, 95-107. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.04.019>.

- Kraus, T. A., Bianco, C. A., y Núñez, C. O. (1999). Los ambientes naturales del sur de la Provincia de Córdoba. Fundación de la Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47,425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>.
- Nelson, D. W. & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. (2nd ed., Agronomy Monograph 9). (pp. 539-579). Am. Soc. Agron. Inc. – Soil Sci. Soc. Am. Inc.
- Ontivero, R. E., Risio Allione, L., Castellarini, F. y Lugo, M. A. (2023). Composición de las comunidades de hongos micorrícicos arbusculares en diferentes usos de suelo en el Cardenal, Argentina. *Ecología Austral*, 33(1), 095-107. <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.1.0.1955>
- R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: a review. *Geoderma*, 314,122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.
- Rienzi, E. A., Marchi, A. & Rodriguez, G. (2018). Aggregate size, particulate and total organic carbon in different land uses on a sandy loam soil exposed to wind erosion. *Advances in Agricultural Science*, 6(3),95-111.
- Robinson, G. W. (1922). A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. *The Journal of Agricultural Science*, 12(3), 306-321.
- Roldán, M. F., Studdert, G. A., Videla, C. C., San Martino, S. y Picone, L. (2014). Distribución de tamaño y estabilidad de agregados en molisoles bajo labranzas contrastantes. *Ciencia del Suelo*, 32(2), 247-257. [http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol\\_32n2/pag.%20247-257.pdf](http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_32n2/pag.%20247-257.pdf)
- Saygin, S. L., Cornelis, W. M., Erpul, G. & Gabriels, D. (2012). Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. *Applied Soil Ecology*, 54,1-6. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.11.012>.
- Six, J., Elliott, E. T. & Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3),1042-49. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431042x>.
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K. & Doran, J. W. (1998). Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5), 1367-1377.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Deneff, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79,7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.
- Tourn, S. N., Studdert, G. A. & Videla, C. C. (2019). Ecological agriculture intensification through crop-pasture rotations does improve aggregation of Southeastern-Pampas Mollisols. *Soil and Tillage Research*, 195,104411. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104411>
- Tourn, S. N., Agostini, M. A., Domínguez, G. F. y Studdert, G. A. (2020). Evaluación de métodos de determinación de la estabilidad estructural en un molisol del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 38 (2),355-365.
- Walkley, A. & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.